

관개 논에서의 영양물질 추정 모형의 개발

Development of CREAMS-PADDY Model for Simulating Pollutants from Irrigated Paddies

서춘석* · 박승우** · 임상준*** · 윤광식**** · 김상민** · 강문성**

Seo, Chun Suk · Park, Seung Woo · Im, Sang Jun
Yoon, Kwang Sik · Kim, Sang Min · Kang, Moon Sung

Abstract

The objective of this study was to develop a modified CREAMS model for paddy field conditions. The model simulates daily balance of water and nutrient from irrigated paddies using meteorological, irrigation, and agricultural management data. The model simulates daily evapotranspiration of paddy using Penman equation and determines daily flooding depth changes. Total nitrogen and phosphorus concentrations within flooding water, surface runoff, and leaching water from a paddy field also can be simulated.

Parameters of the model were calibrated using observed data of the Agricultural Experiment Station of the Seoul National University in Suwon Korea. The model was applied for the irrigation period of paddy field in Gicheon area when 1,234 mm annual rainfall was occurred. The simulated losses of the total nitrogen and total phosphorus were 11.27 kg/ha and 0.98 kg/ha, respectively. There was a good agreement between observed and simulated data. It was found that CREAMS-PADDY model was capable of predicting runoff and nutrient losses from irrigated paddy fields.

Keywords : CREAMS-PADDY, CREAMS, TP, NPS, Paddy

I. 서 론

하천 및 호소의 수질관리에 있어 농업비점오염(nonpoint source, NPS)의 관리 및 영향에 대한 평가의 중요성이 대두되어 왔다(Park, 1996).¹⁾ 특히 우리나라 전체 농경지의 60%를 차지하고 있는 논으로부터의 오염물질의 배출은 농업비점오염의 큰 비중을 차지하고 있다. 논에서의 영양물질의 유출은 강우 및 영농방식에 따라 다르므로, 논에서의 오염물질의 유·출입 수지와 유출 메커니즘에 대한

* 현대엔지니어링 수자원개발부
** 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과
*** Virginia Tech. Biological Systems Engr. Dept.
**** 전남대학교 농생대 (농업과학기술연구소)
* Corresponding author. Tel.: +82-2-2166-8739
fax: +82-2-2646-6497
E-mail address: scs99@hec.co.kr

정량적인 평가와 더불어 논에서의 영양물질의 거동을 예측하여 서로 다른 기상조건과 영농조건에서의 유출부하량을 평가할 수 있는 모형이 필요한 실정이다.

현재까지 논에서의 물질순환과정에 관한 모형으로는 일본의 Shoji (1986)¹³⁾의 질소흡수기작모형, Mori (1991)³⁾의 질소, 인 이동기작모형 등이 있다. 하지만, 이들 모형은 특정한 토양조건에서 유도된 회귀식을 사용하며 모의발생 시간간격이 짧아서 비점오염모형으로서의 범용성이 부족하다.

본 연구는 포장단위 농업비점오염 모형인 CREAMS 모형을 담수상태인 논에서의 물수지 및 영농변화 등에 대처할 수 있도록 개선하며, 또한 담수 환원조건에 맞는 영양물질 반응식으로 개선한 CREAMS-PADDY 모형을 구성하는 것이다. 또한 실험포장 및 실제 농민이 운영하는 논에서의 벼의 생육기간 동안 논에서의 물질순환을 모니터링하여 시기별 담수농도 및 유출부하의 특성을 파악하여 CREAMS-PADDY 모형의 추정치와 비교하여 모형의 적용성을 평가하는데 있다.

II. 모형의 구성

모형은 크게 논에서의 물수지를 중심으로 한 수문모형과 토양유실량을 모의하는 토양침식모형, 질소 및 인의 거동을 예측하는 화학물질 모형으로 나눌 수 있다. 모형은 기존의 CREAMS 모형의 입출력 형태를 그대로 유지하도록 했으며, 기존의 부모모형에 논에서의 물수지 및 물질 이동식을 추가하였다. 따라서 관개기의 논에 대한 물질들의 반응은 기존모형의 틀에서 모의될 수 있도록 구성되었다. 모형의 개괄적인 구성은 아래 Fig. 1과 같다.

1. 논에서의 물수지

논으로의 용수 유입량은 관개량이 없는 경우 강우량에 의하여 결정되며, 유출량은 논의 배수방식에 크게 영향을 받게 된다. 논에서 배수방식은 경작자에 따라 다르지만 대부분 적정담수심을 유지할 수 있는 배수물꼬를 만들거나 배수공을 설치하여 적정담수심 이상의 물은 자연적으로 배수되도록 하고 있다. 따라서 논과 배수물꼬는 각각 논둑을 경

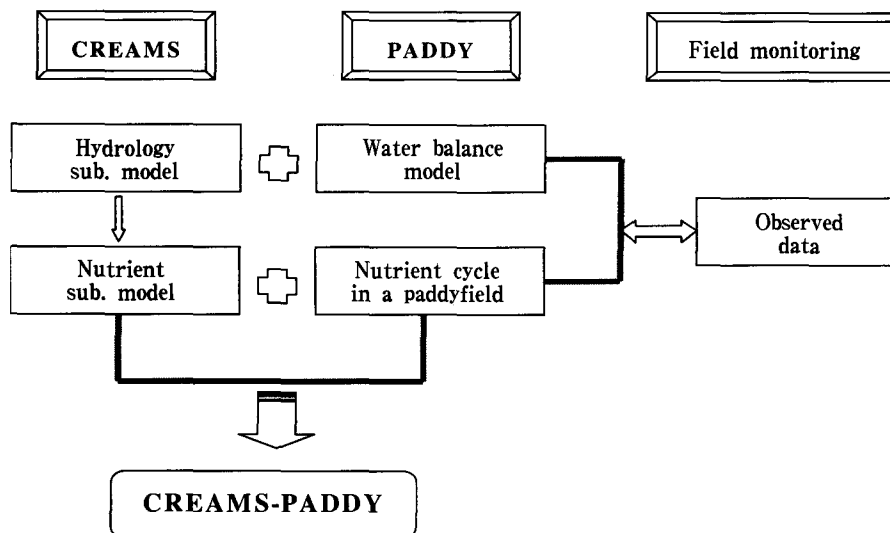


Fig. 1 Schematic diagram of CREAMS-PADDY model development

계로 하는 저수지와 물넘이의 역할을 하는 것으로 생각할 수 있으며, 배수물꼬의 유출특성이 논에서의 유출특성을 결정하는 중요한 인자가 된다.

논에서의 일별 담수심은 Fig. 2에서와 같이 강우량, 관개량, 침투량, 증발산량, 유출량 등의 변화에 따라 좌우된다. 따라서 담수심의 일별 변화를 물수지식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$W_t = W_{t-1} + IR_t + RAIN_t - INF_t - ET_t - DR_t \dots (1)$$

여기서, W 는 담수심(mm), IR 은 관개량(mm), $RAIN$ 은 강우량(mm), INF 는 침투량(mm), ET 는 증발산량(mm), DR 은 유출량(mm), 그리고 t 는 시간변수이다.

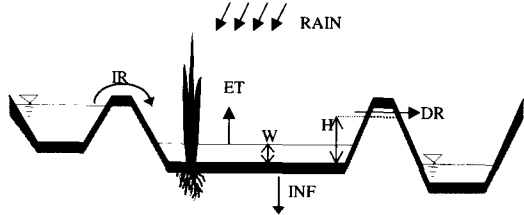


Fig. 2 Water balance in paddy fields

유출량(DR)은 담수심이 물꼬높이 이상일 경우 물꼬높이 이상의 양은 전량 지표배수되는 것으로 가정하였다. 관개량(IR)은 일별 관개량 자료로부터 입력하거나 필요수량과 논에서의 물수지를 이용하여 계산할 수 있도록 하였다. 증발산량(ET)은 CREAMS와 같이 Ritche(1972)¹¹⁾식을 사용할 경우 과소 평가될 수 있으므로 현재 우리 나라에서 논벼의 일증발산량을 추정하는데 보편적으로 사용하며, 검정된 FAO 수정 Penman식과 작물계수를 이용하여 식(2)와 같이 구하였다.

$$ET_t = K_c \cdot ET_p \dots \dots \dots (2)$$

여기서, ET_t 는 논벼의 실제 증발산량(mm/day), K_c 는 논벼의 작물계수이며, ET_p 는 잠재증발산량(mm/day)이다. 침투량(INF)은 논 토양조건이나

토층 구조, 담수심, 경지의 고저차, 지질, 지하수위에 따라 큰 차이가 있으므로, 실측값을 사용하도록 하였다.

2. 관개논 영양물질 수치

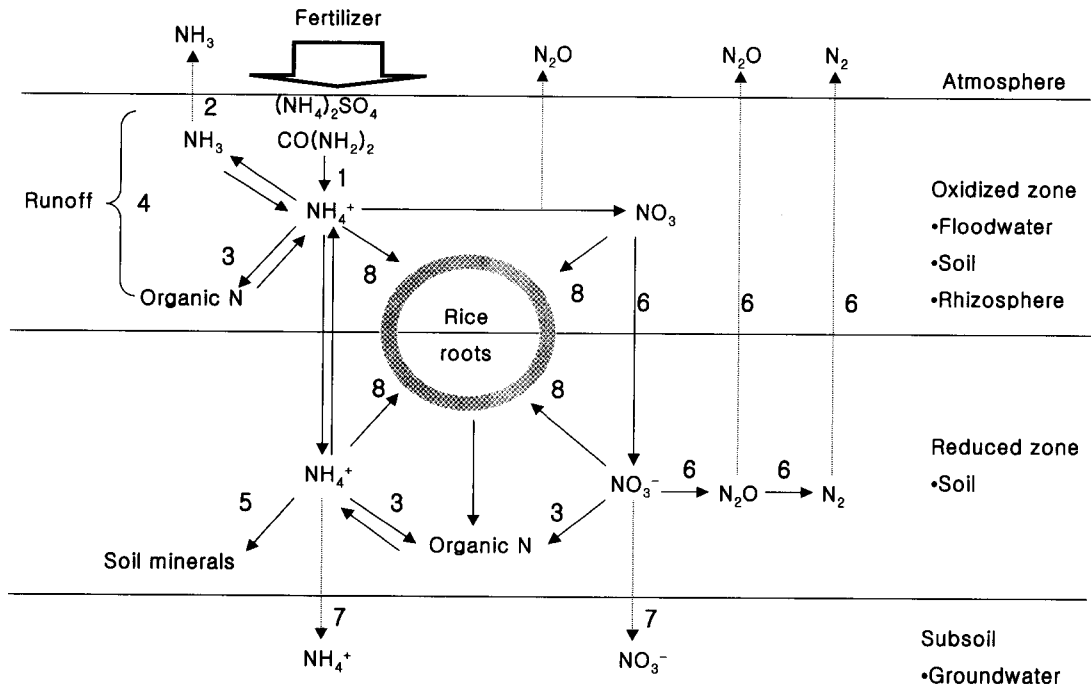
논에서의 영양물질의 이동 및 반응은 Fig. 3과 같이 산화층과 환원층으로 구분하여 설정하였다. 산화층은 담수와 토양표층 1cm로 가정하였으며, 논에서의 유출에 의한 영양물질의 유실은 산화층의 농도에 따라 결정되는 것으로 가정하였다. 영양물질의 형태는 질소의 경우 산화와 환원층에서의 반응양상이 다르므로 암모니아태 질소와 질산태 질소, 유기태 질소 등으로 구분하여 반응식을 구성하였다. 논에서의 인산의 거동은 산화층과 환원층의 반응이 같다고 보았으며, 작물에 의한 흡수는 환원층에서 발생한다고 가정하였다.

논으로의 영양물질의 유출입은 강우와 관개수에 용해되어 유입되거나, 비료 및 유기물 형태로 투입되어 용탈, 작물에 의한 흡수 등으로 소비되고 질소의 경우는 탈질, 휘산 등으로도 손실이 발생한다. 또한 용해상태로 표면유출과 함께 유출되거나, 토양에 흡착되어 유실된다. 흡착된 형태로도 존재하는 암모니아태 질소와 인산의 경우는 Langmuir의 등은 흡착식을 이용하여 흡착 및 용해농도를 구하였다.

토양내 물질의 이동기작을 해석하는 방법으로는 식(3)과 같은 이류-확산반응식을 이용한 수치적 해석방법이 이용되어져 왔다(Selim and Iskandar, 1981).¹²⁾

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta D \frac{\partial C}{\partial z}) - \frac{\partial}{\partial z} (qC) + A \dots \dots \dots (3)$$

여기서, θ 는 토양수분 함량 (m^3 water / m^3 soil), C 는 영양물질 농도 (g/m^3), S 는 흡착량 (mg/kg), D 는 확산계수 (m^2/day), q 는 깊이 방향



1=Urea-Hydrolysis, 2=Ammonia-volatilization, 3=Nitrogen-Immobilization, 4=Runoff, 5=Ammonium Fixation, 6=Denitrification, 7=Leaching, 8=Plant Uptake.(Source : IRRI, 1979, NITROGEN AND RICE, PP. 175)

Fig. 3 Fate of fertilizer N in irrigated paddy soil

의 유속(m/day), Δ 는 영양물질의 공급 및 유출 (g/m²/day)이다. 대부분의 연구에서는(Liwang, 1999)⁸⁾ 질산태 질소는 이동성이 크며, 암모니아태 질소 및 인산은 흡착등으로 유출에 의한 손실이 적다고 가정하고 이류-확산식을 간단한 물질수지식을 이용하여 표현하였다. 본 연구에서는 식(3)을 간단히 정리하여 Table 1과 같은 물질수지식으로 구성하였다.

영양물질의 반응식들은 Table 2와 같이 표현하였다. 질산화 과정은 암모니아태 질소의 함량에 따른 1차 반응식으로 토양의 온도와 수분함량의 함수로 표현하였으며(Das et al., 1995 ; De Datta, 1987 ; Cabon, 1991),^{5),6),4)} 휘산은 암모니아태 질소의 농도와 온도 및 pH의 영향을 받는 1차 반응식으로 표현하였다(Martin and Chapman, 1951).⁹⁾ 유기물의 무기화는 잠재 무기화량에 대한

1차 반응식을 표현하였으며(Reddy and Patrick, 1986 ; Stanford and Smith, 1972),^{10),15)} 탈질 반응식은 질산태 질소의 농도, 분해가능 유기탄소의 공급량, 혐기조건, 온도등의 함수로 표현하였다(Park, 1999 ; Sohn, 1998).^{2),14)} 작물에 의한 영양물질의 흡수량은 작물의 물사용과 작물내 영양물질의 함유량의 함수로 표현된 작물성장함수로 표현하였다(Knisel, 1980).⁷⁾

논으로부터의 영양물질의 배출량은 산화층 및 환원층에서의 반응식에 의해 용해농도(C)가 결정되면 유출 및 침투에 의한 이동량은 지표배수량(DR)과 지하침투수량(INF)으로부터 다음과 같이 산출될 수 있다.

$$RONH = C \times DR \times 0.01$$

$$DWNH = C \times INF \times 0.01 \dots \dots \dots (4)$$

Table 1 Nutrients balance equations in paddy fields

(Unit : kg/ha)

Layer	Constituent	Balance
Oxidized zone	NH ₄ -N	SOLNH _t = SOLNH _{t-1} + FERNH _t + RAINNH _t + IRRINH _t - RNIT _t - VOLT _t - DWNH _t - RONH _t - SEDN _t
	NO ₃ -N	SOLNO _t = SOLNO _{t-1} + FERNO _t + RAINNO _t + IRRINO _t + RNIT _t - DNIT _t - DWNO _t - RONO _t
	ORG-N	SOLORN _t = SOLORN _{t-1} + FERORN _t + RAINORN _t + IRRIORN _t - DWORN _t - ROOORN _t
	T-P	SOLP _t = SOLP _{t-1} + FERP _t + RAINP _t + IRRIP _t - DWP _t - ROP _t - SEDP _t
Reduced zone	NH ₄ -N	AMMO _t = AMMO _{t-1} + FERNH ₂ + DWNH _t + MINEL _t + FIXN _t - RNIT ₂ - UPNH _t - UPNH _t - PERNH _t
	NO ₃ -N	NOX _t = NOX _{t-1} + FERNO ₂ + DWNO _t + RNIT ₂ - DNI ₂ - UPNO _t - PERNO _t
	ORG-N	RORGN _t = RORGN _t + DWORN _t + DECAY _t - MINEL _t - PERORGN _t
	T-P	PO ₄ _t = PO ₄ _{t-1} + FERP ₂ + DWP _t - UPPO ₄ - PERP _t

FER__ : fertilization, RAIN__ : from rainfall, IRRI__ : from irrigation, DW__ : infiltration
 RO__ : runoff, SED__ : sediment bounded runoff, UP__ : uptake, PER__ : leaching

- Oxidized zone SOLNH : ammonium, SOLNO : nitrate, SOLORN : organic-N, SOLP : phosphorus
 RNIT : nitrification, VOLT : volatilization, DNIT : denitrification, FIXN : fixation
- Reduced zone AMMO : ammonium, NOX : nitrate, RNIT₂ : nitrification, RORGN : organic-N,
 PO₄ : phosphorus
 MINEL : mineralization, DNI₂ : denitrification, DECAY : decay, MINEL : mineralization,

Table 2 Reaction equations and parameters

Reaction	Reaction equation	Reference
Nitrification (kg/ha/day)	$RNIT = Kn \times SOLNH \times f_n(\theta) \times g_n(T)$ $f_n(\theta) = \theta / \theta_{fc}$ if $\theta < \theta_{fc}$ $= \theta_{fc} / \theta$ if $\theta \geq \theta_{fc}$ $g_n(T) = 1.071^{(T-35)}$	Kn : nitrification coefficient θ : volumetric water content (cm ³ /cm ³) θ_{fc} : volumetric water content at field capacity (cm ³ /cm ³) T : soil temperature (°C)
Volatilization (kg/ha/day)	$VOLT = D_A / x \times C_{sa} \times f_v(\theta) \times g_v(T) \times 10$ $C_{sa} = 10^{pH-pK} \times C_{NH}$ $f_v(\theta) = \theta / \theta_s$ $g_v(T) = e^{(T-10)/10}$	D _A : diffusion coefficient (m ² /day) x : stagnant boundary layer of air (m) pK : 9.4 θ_s : moisture content at saturation
Mineralization (kg/ha/day)	$MINEL = K_m \times g_m(T) \times [C_{on}]$ $g_m(T) = 1.071^{(T-35)}$	K _m : mineralization rate coefficient (day ⁻¹)

Reaction	Reaction equation	Reference
Denitrification (kg/ha/day)	$DNT = V_{md} \times 0.1NOx / (K_{dnt} + 0.1NOx) \times f_d(\theta) \times g_d(T) \times h_d(C) \times 10$ $f_d(\theta) = 0 \quad \theta \leq \theta_d$ $= [(\theta - \theta_d) / (\theta_s - \theta_d)]^m \quad \theta_d \leq \theta \leq \theta_s$ $g_d(T) = 1.12^{(T-20)}$ $h_d(C) = C_{wc} / (K_c + C_{wc})$ $C_{wc} = \rho_b \times (19.2 \times C_{tc} - 4.99) \times SDEPTH$	V_{md} : potential denitrification amount K_{dnt} : denitrification coefficient C_{wc} : water extractable organic carbon content(g/m ²) K_c : constant C_{tc} : total soil carbon(g/100g soil) ρ : bulk density(g/cm ³)
Plant uptake (kg/ha/day)	$UP_i = C_i \times DM_i$ $UPPO4 = UP \times (1 - RNP)$ $C_i = c_1 \times (DM_i / TDM)^{c_2}$ $DM_i = \sum WU_i / PWU \times YP \times K$	DM : accumulated dry matter production TDM : total dry matter production C_i : N concentration in the plant c_1, c_2 : parameter WU : daily plant water use PWU : total plant water use YP : the crop yield potential K : the ratio of dry matter to crop yield RNP : N : P ratio(75)

토양입자에 흡착되어 손실되는 부하량은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$ERN = a \times SED^b$$

$$SEDN = S_e \times SED \times ERN \times 10^{-6} \dots \dots \dots (5)$$

여기서, RONH(kg/ha)는 논으로부터의 유출부하량, C는 농도(mg/L), DWNH(kg/ha)는 침투에 의한 손실량이다. SED은 토양유실량(kg/ha)이며, ERN은 토사의 부속도, a와 b는 계수로 a=7.4, b=-0.2이다.

III. 대상지구 및 자료

1. 대상지구

본 연구에서는 관개기간 논에서의 수문 및 물질 모니터링을 위한 시험지구로 경기도 수원시에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 시험포장과 경기도 화성군 팔탄면 기천리 일대의 기천지구를 선정

하였다. 서울대학교 시험포장의 자료는 1996년 4월 25일부터 9월 10일까지 약 120일간 모니터링한 자료를 사용하였으며, 기천지구의 경우는 2000년 5월에서 9월간 2.7 ha의 관개블록에서 모니터링한 자료를 사용하였다.

1996년 수원포장의 경우 질소질 비료 시비량은 기비 146 kg/ha(5월 24일), 분얼비 87 kg/ha(6월 4일), 실비 59 kg/ha(7월 10일)로 시비되었으며, 인산 시비량은 기비 80 kg/ha(6월 4일)로 시비되었다. 2000년 기천지구의 경우 총질소는 기비 84 kg/ha(5월 20일), 분얼비 92 kg/ha(6월 1일), 실비 59 kg/ha(7월 24일) 등 총 235 kg/ha이 시비되었으며, 인산의 경우는 기비로 63 kg/ha(5월 20일)이 시비되었다. 시험포장에서의 시비량은 질소 비료의 경우 벼 표준시비량인 110 kg/ha과 우리나라 평균 시비량인 212.8 kg/ha보다 많은 양이 시비되었으며, 인산 비료의 경우 표준시비량 70 kg/ha과 비슷한 양이 시비되었다.

2. 물수지 자료

시험지구의 물수지 자료 조사를 위해 강우량과 배수량을 측정하였다. 기천지구의 경우 강우량은 지구에서 0.5 km 떨어진 팔탄면사무소에 자기강우계를 설치하여 일 강우량 자료를 수집하였다. 기상 자료는 시험지구에서 약 북동쪽으로 5 km에 위치한 수원측후소의 관측자료를 이용하였다. 배수량 측정은 기천지구에서만 이루어졌으며, 측정 및 계산된 물수지 값은 아래 Table 3과 같다.

1996년은 관개기간동안 강우가 총 638 mm로 예년에 비하여 상대적으로 적었으며, 6~7월에 집중되어 있으며, 특히 6월 17일은 153.6 mm의 강우가 내렸다. 조사기간 중 침투량은 446 mm이고, 관개량은 863 mm로 추정되었다. 2000년은 벼의 생육기간인 5월~9월의 강우량은 1,243 mm로 장마기간 이후 7, 8월 기간 동안 집중호우로 인하여 예년에 비하여 많은 강우가 내렸다. 50 mm 이상의 강우가 9회 왔으며, 100 mm 이상의 강우로는 7월22일 303.6 mm의 폭우가 있었다. 또한 조사기간 중 관개량은 918 mm, 침투량은 524 mm,

유출량은 956 mm 이었다.

3. 물질수지 자료

시험지구에서의 논물 시료의 채취는 이양후부터 담수가 끝나는 9월 초순까지 주 1회 채취하였으며, 유출수는 폭우시 출장으로 채취하였다. 이와 더불어 관개수 및 강우의 수질도 병행 측정하였다.

샘플링한 시료는 실험실내에서 수질공정시험법에 따라 질소 및 인의 농도를 측정하였다. 기천지구 논물의 경우, 총질소의 함량은 0.508~6.897 mg/L의 범위로 평균 1.986 mg/L, 암모니아태 질소는 0~1.768 mg/L의 범위로 평균 0.376 mg/L이며, 질산태 질소 0~4.577 mg/L의 범위로 평균 0.787 mg/L로 나타났다. 암모니아태 질소의 경우 분얼비인 요소비료 시비의 표층시비 후 급격히 증가하는 경향을 가졌다. 총인의 함량은 0.012~0.160 mg/L의 범위로 평균 0.045 mg/L였으며, 기비 후 일시적으로 증가하였다가 점차 감소하는 경향을 나타냈다. Table 4는 1996년과 2000년에 측정된 논에서의 물질농도의 평균값이다.

강우의 수질은 실험지역에서 약 5 km 거리에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 옥상에서 약 9회 정도에 걸쳐 샘플링 하였다. 강우의 경우 1996년과 2000년의 모니터링 위치가 동일함에도 그 평균값은 많은 차이를 나타냈다. 이는 강우의 수질이 계절적으로 시기적으로 큰 변동을 하고 있음을 알 수 있다.

관개수의 총질소 농도는 평균 1.091 mg/L, 총인

Table 3 Water balance in paddy fields

(Unit : mm)

	Rain	Runoff	Infiltration	Irrigation	*ET
Suwon (1996)	638	-	446	863	646
Gicheon (2000)	1,243	956	524	918	680

*Estimated Evapotranspiration

Table 4 Observed mean concentration of T-N, T-P in rainfall, irrigation, flooding and runoff water

(Unit : mg/L)

	Irrigation		Rainfall		Flooding water in paddy field		Runoff water	
	T-N	T-P	T-N	T-P	T-N	T-P	T-N	T-P
Suwon(1996)	-	-	2.480	0.100	4.020	0.260	-	-
Gicheon(2000)	1.091	0.028	1.090	0.036	1.986	0.045	2.05	0.097

RMSE는 8.58 mm, E²은 0.90이었다.

토양침식모형의 경우 모의기간동안 67.2 kg/ha가 유실되는 것으로 모의되었으나 영양물질의 흡착 유출에 기여할 정도의 큰 양은 아니었다. 이는 USLE의 LS인자와 P인자의 값이 작게 설정되어 있으므로 작은 강우에 대해서는 토양유실이 매우 작게 모의되었기 때문이다. R²는 0.97로 높게 나타났으며, RMSE는 5.35 kg/ha, E²은 0.94이었다.

논물의 영양물질농도 변화에 대한 모의치와 실측치간의 산포도는 Fig. 6~7과 같다. 논물 농도의 모의에 대한 검정결과 총질소의 경우 결정계수는 0.84, 총인 농도에 대한 결정계수는 0.73이었다. 모형을 통한 관개기간 동안의 총유출 부하량은 총질소가 11.271 kg/ha, 총인의 경우는 0.98 kg/ha가 배출되는 것으로 모의되었으며, Fig. 8~9는 모의치와 실측치간의 산포도를 나타낸 것이며, Table 6은 유출부하량에 대한 R²과 RMSE 및 E²의 값을 정리한 것으로, 전체적으로 정확성이 높게 나타났으며, 모형의 효율도 안정권 안에 있음을 알 수 있다.

Table 6 Observed and simulated nutrients runoff load of verification results(2000)

	Event mean load (kg/ha)		R ²	RMSE	E ²
	Observed	Simulated			
T-N	0.36	0.35	0.80	0.27	0.51
T-P	0.03	0.03	0.31	0.06	0.30

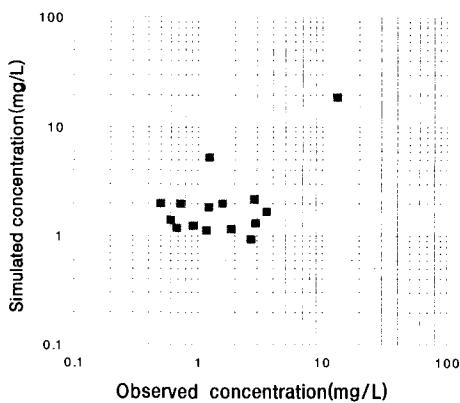


Fig. 6 Verification results of T-N concentration in paddy water(2000)

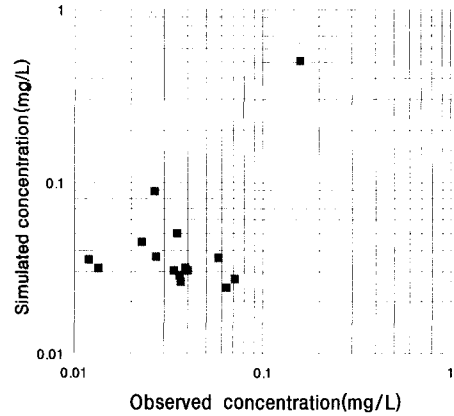


Fig. 7 Verification results of T-P concentration in paddy water(2000)

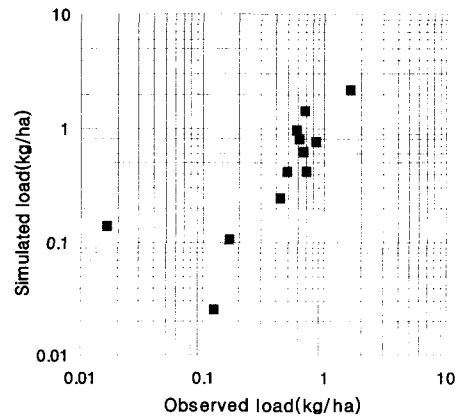


Fig. 8 Verification results of T-N runoff loading in outflow water(2000)

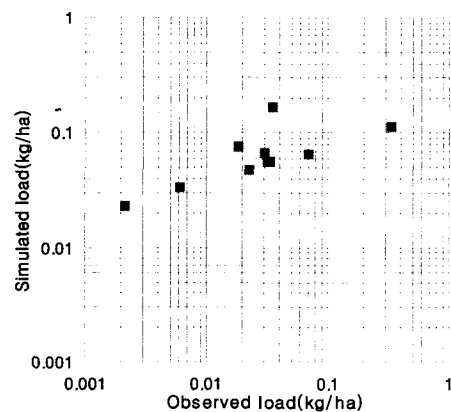


Fig. 9 Verification results of T-P runoff loading in outflow water(2000)

VI. 요약 및 결론

우리나라 농업비점오염의 주를 이루고 있는 논에서의 오염물질의 배출부하량을 산정하기 위하여, 포장단위 비점원오염모형인 CREAMS 모형을 개선한 CREAMS-PADDY 모형을 구성하였다. 수문부 모형의 경우 증발산 산정을 위해 FAO 수정 Penman식을 이용하였으며, 논에서의 물수지식을 추가하여 유출량을 추정하도록 하였다. 물질부 모형의 경우 담수상태에서의 물질들의 거동을 예측하기 위하여 산화와 환원층으로 구분하여 반응식들을 구성하였다. 구성된 모형은 1996년 경기도 수원시 서울대학교 농장의 담수농도자료에 대하여 적용하여 모형의 매개변수를 결정하고, 2000년 경기도 화성군 팔탄면 기천리에 위치한 논에서의 담수농도의 변화 및 배출부하량자료에 대한 검정을 통하여 모형의 적용성을 평가하였다. 1996년 수원의 담수농도자료를 대상으로 보정한 결과 총질소의 경우 결정계수가 0.92, E^2 이 0.49, 총인의 경우 결정계수가 0.57로 실측값과 모의치가 유사하게 모의되었다. 또한, E^2 이 0.39로 모형의 효율도 0과 1 사이에 있으므로 안정적이라고 할 수 있다. 모형의 검정결과 관계기간인 5월에서 9월까지의 논에서의 영양물질 유출량은 2000년 경기도 화성군 기천 시험포장 논인 경우 강우량 1,243 mm에 대하여 총질소는 11.27 kg/ha, 총인은 0.98 kg/ha가 배출되었다.

본 연구에서는 기존의 밭 중심의 포장모형인 CREAMS 모형에 논에서의 물수지 및 물질수지를 추가하여 개선한 CREAMS-PADDY 모형을 개발하여 적용하였다. 개발된 CREAMS-PADDY 모형을 이용하여 논에서의 오염물질 배출에 대한 정량적 평가가 가능할 것으로 기대되며, 이러한 결과를 이용하여 하천, 호소 및 농업유역에서의 수질을 정량적으로 추정하여 수질오염을 관리하는 데 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술사업단의 연구비지원(과제번호4-5-1)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Park, S. W. 1996. Best management method in agricultural watershed environment. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 38(3) : 15-23. (in Korean)
2. Park, E. J. 1999. Observations and modeling of N dynamics in a flooding area of riparian ecosystem. Ph.D. diss. : Seoul National University. (in Korean)
3. Mori, Y. 1990. A model for changes in the surface water nitrogen concentration in paddy fields. *Trans. JSIDRE* 146 : 15-25.
4. Cabon, F., G. and E. Ledoux. 1991. Modelling of the nitrogen cycle in farm land areas. In *Nitrogen Turnover in the Soil-crop System*, eds. J. J. R. Groot, P. de Willigen, E. L. K. Verberne, 161-169. Netherlands : Kluwer Academic Publishers.
5. Das, B. S., J. K. Gerard and P. M. Gary. 1995. Temperature dependence of nitrogen mineralization rate constant. *A Theoretical Approach, Soil Science* 159(5) : 294-300.
6. De Datta, S. K. 1987. Nitrogen transformation process in relation to improved cultural practices for lowland rice, *Plant Soil* 100 : 47-69.
7. Knisel, W. G. 1980. CREAMS : A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems, Conservation Report No. 26, USDA-SEA, Washington, D.C.
8. Liwang, M., C. W. Lindau, C. Honpayoon, W. Burhan, B. C. Jang, W. H. Partick and H. M.

- Selim. 1999. Modeling urea, ammonium, and nitrate transport and transformations in flooded soil columns, *Soil Science* 164(2) : 123-132
9. Martin, J. P. and H. D. Chapman. 1951. Volatilization of ammonia from surface-fertilized soils, *Soil Sci.* 71 : 25-34.
10. Reddy, K. R. and W. H. Patrick, Jr. 1986. Fate of fertilizer nitrogen in the rice root zone, *Soil Sci, Soc. Am. J.* 50 : 649-651.
11. Ritche, J. T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research* 8(5) : 1204-1213.
12. Selim, H. M. and I. K. Iskandar. 1981. Modeling nitrogen transport and transformation in soils: 1. Theoretical considerations, *Soil Science* 131 : 233-241.
13. Shoji, S., H. Ando, G. Wada. 1986. Fate of nitrogen in paddy fields and nitrogen absorption by rice plants. *JARQ* 20(2) : 127-133.
14. Sohn, B. 1998. Effects of carbon, nitrate, and moisture on denitrification in riparian soil of Yangjae Stream, M. S. diss.: Seoul National University. (in Korean)
15. Stanford, G. and S. J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 36 : 465-472.